



TITLE:

Single-Ion Spectroscopy of Two Electric Quadrupole Transitions in Ytterbium Ion and Excess Micromotion Minimization(Abstract_要旨)

AUTHOR(S):

Imai, Yasutaka

CITATION:

Imai, Yasutaka. Single-Ion Spectroscopy of Two Electric Quadrupole Transitions in Ytterbium Ion and Excess Micromotion Minimization. 京都大学, 2020, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2020-05-25

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k22659>

RIGHT:

許諾条件により本文は2021-05-25に公開

| | | | |
|---|---|----|---------|
| 京都大学 | 博士（工学） | 氏名 | 今 井 康 貴 |
| 論文題目 | Single-Ion Spectroscopy of Two Electric Quadrupole Transitions in Ytterbium Ion and Excess Micromotion Minimization（Yb イオンの2つの電気四重極子遷移の単一イオン分光および過剰マイクロ運動の最小化 | | |
| <p>（論文内容の要旨）</p> <p>本論文は、単一のイッテルビウムイオン(Yb⁺)をイオントラップに閉じ込め、Yb⁺のもつ 2 つの電気四重極子遷移の精密分光を行ったことに関して、このことを可能としたさまざまな装置開発と分光条件を突き詰めた結果とともにまとめたものであって、8 章からなっている。</p> <p>第 1 章は序論であり、光領域の長寿命遷移を参照周波数とする原子時計、すなわち光時計の開発の現状と、その基礎物理学への応用についてまとめている。その中で Yb⁺の優位性、そして本研究の意義と位置づけを明らかにしている。</p> <p>第 2 章は、本研究に関連する理論と原理をまとめたものである。イオンを閉じ込める RF トラップとイオンの並進エネルギーを低減させるレーザー冷却の原理について述べ、RF トラップ中のイオンの冷却で問題となる過剰マイクロ運動とその検出法について記述している。また、Yb⁺の性質についても述べている。</p> <p>第 3 章は、本研究のために開発した実験装置について記述したものである。まず、単一 Yb⁺を長時間冷却状態に保つために、レーザー冷却用光源の周波数安定度を改善したことについて述べている。冷却光は、2 台の外部共振器型半導体レーザーの和周波混合で発生させている。そのうち 1 台を、²S_{1/2}–²D_{5/2} 遷移分光用レーザーにオフセットロックし、これをもとに和周波光を安定化させた。和周波の周波数安定度は、長時間の計測に十分な 200 kHz/h 以下に改善されている。また、2 つの電気四重極遷移励起用レーザーの正確な周波数掃引機構を、位相同期させたオフセットロックレーザー、あるいは外部に音響光学変調器を設置する方法で構築したことについて述べている。そして、Field-Programmable Gate Array(FPGA)を含むコンピュータ制御による高速分光システムを構築したことを記述している。使用した RF トラップ装置についても述べている。</p> <p>第 4 章は、Yb⁺のレーザー冷却実験について記述したものである。超微細構造をもたない ¹⁷⁴Yb⁺を用いて、単一イオンの導入方法を確立したこと、磁場の最適化、および RF 光子相互関係法を導入して過剰マイクロ運動の検出と最小化をおこなったことについて述べている。つづいて、磁場に鈍感な時計遷移をもつが超微細構造のためレーザー冷却や分光法が複雑になる、¹⁷¹Yb⁺のレーザー冷却方法を確立したことについて述べている。先行研究と異なり、レーザー冷却に関係する超微細構造間遷移すべてに対して独立なレーザーを用意し、冷却に対して最適な条件を詳細に調べている。最適な磁場の向きと強度、および ²S_{1/2}(F=0)–²P_{1/2}(F=1)サブ冷却遷移を励起するレーザー光のパワーが 1 nW 以上必要であることを明らかにしている。</p> <p>第 5 章は、¹⁷⁴Yb⁺ ²S_{1/2}–²D_{5/2} 遷移の単一イオン分光について述べたものである。寿命が 10 年近い、²F_{7/2} 準位への崩壊を利用した励起の検出と、²F_{7/2} 準位からの脱励起による繰り返し観測を含む、高速の分光システムを構築したこと、このシステムを用いて、特定の磁気副準位間遷移を選択して高分解能に検出することに成功したこと、について述べている。最終的に、永年運動に起因する振動サイドバンドが分離された、高分解能のスペクトルの検出に成功している。</p> | | | |

| | | | |
|---|--------|----|---------|
| 京都大学 | 博士（工学） | 氏名 | 今 井 康 貴 |
| <p>第 6 章は、$^{171}\text{Yb}^+ \ ^2\text{S}_{1/2} - ^2\text{D}_{3/2}$ 遷移の単一イオン分光について述べたものである。超微細構造により分光手順が複雑になるため、分光条件の確立から開始している。分光の励起先である $^2\text{D}_{3/2}(\text{F}=2)$ 準位を、レーザー冷却サイクルから分離する必要がある。メインリボンピング遷移 $^2\text{D}_{3/2}(\text{F}=1) - ^3\text{D}[3/2]_{1/2}(\text{F}=0)$ を駆動するレーザーのパワーを 1 mW 以下に設定すると、飽和広がり为了避免してレーザー冷却サイクルから分離できることを示している。サブ冷却レーザーを遮断してから分光の初期状態 $^2\text{S}_{1/2}(\text{F}=0)$ 準位にポンピングするまでに必要な時間を、10 ms と決定している。分光条件を確立したのち、分解能を上げてスペクトル測定を進めている。まず、5 つある磁気副準位間遷移を分離して磁場に鈍感な $m_{\text{F}}=0 - m'_{\text{F}}=0$ 遷移を同定した。さらに、$m_{\text{F}}=0 - m'_{\text{F}}=0$ 遷移スペクトルのキャリアとサイドバンドを分離した。そして、分光用レーザーの周波数の時間変動を補正し、スペクトルを幅 380 Hz で検出した。このスペクトル幅がほぼレーザーの発振線幅で決まっていることを明らかにしている。</p> <p>第 7 章は、過剰マイクロ運動の最小化とサイドバンドスペクトルの関係について、詳細に調べた結果を述べたものである。トラップ中のイオンの永年運動等の振動を電氣的共鳴で励起する方法を用いて、振動周波数のトラップパラメータ依存性が測定されている。その結果から、サイドバンドスペクトルに現れる構造が、周波数の異なる永年運動による位相変調の混合により発生したものであることが突き止められている。さらに、これは位相変調で変調指数が大きい場合に観測される現象であり、単一イオンがラム・ディッケ領域、およそレーザー光の波長サイズ、を超えた領域まで振動していることが示されている。電気四重極子分光で観測される方向の振動はレーザー冷却されていることから、この現象が、冷却と分光を切り替える短い時間で加熱されることを示すと推測されている。そこで、加熱原因の除去が進められた。冷却光を別方向から同時に照射して永年運動を 3 次元とも冷却しても構造は消失しなかったが、さらに、過剰マイクロ運動を 3 次元とも最小化したところ構造が消失し、到達温度もドップラー冷却限界に近いものが実現できたことを記述している。</p> <p>第 8 章は、結論であり、本論文で得られた成果について要約している。そして、基準スペクトルの検出技術が確立されたことを受け、レーザーの周波数安定化と光時計の不確かさ測定が今後の展望として述べられている。</p> | | | |

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、イオントラップに閉じ込めた単一の Yb^+ の 2 つの電気四重極子遷移の精密分光法を確立した研究成果についてまとめたものであり、得られた成果は次のとおりである。

1. 単一イオン光時計では、観測する原子数が 1 個であることから、信号対雑音比は極めて低く、スペクトルを取得するためには高速で繰り返し測定を行う必要がある。これを実現するために、Field-Programmable Gate Array(FPGA)を含むコンピュータ制御による高速分光システムを構築した。
2. 分光用レーザーの周波数安定度を活用した冷却用レーザーの周波数安定化や、同位体シフト測定に応用可能なオフセットロック方式の周波数掃引機構など、独自性の高い装置を開発した。
3. 磁場に鈍感な遷移をもつ $^{171}\text{Yb}^+$ の $^2\text{S}_{1/2} - ^2\text{D}_{3/2}$ 遷移の単一イオン分光法を確立した。 $^{171}\text{Yb}^+$ は超微細構造をもち、準位構造が複雑である。本研究では先行研究と異なり、レーザー冷却に関連する超微細構造間遷移の全てに独立のレーザーを用意し、レーザー冷却と分光に必要な条件の詳細を決定した。最終的に、分光用レーザーの発振線幅で制限される幅に近いスペクトル幅で、基準スペクトルを検出することに成功した。
4. 振動サイドバンドスペクトルに現れる構造が、異なる方向の永年運動による位相変調の混合に起因することを明らかにした。このことは、冷却から分光に切り替える短時間の間にイオンが加熱されることを示唆している。そこで、加熱の原因となりうるすべての方向の永年運動と過剰マイクロ運動を最小化したところ、当該スペクトルの構造は劇的に減少し、理論冷却限界に近い温度のスペクトルを検出することに成功した。こうした観測の詳細については、これまで報告されていなかった。

本論文は、 Yb^+ 、また、その他のイオン種にも共通する単一イオン光時計の課題とその解決法を明らかにし、光時計の開発を大きく前進させるものであり、その応用に向け、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和 2 年 4 月 20 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。